基于 Matlab的谐波抑制技术的仿真研究

王红然，刘田翠，洪乃刚

(安徽工业大学 电气信息学院，安徽 马鞍山 243002)

摘 要 提出了一种谐波抑制的新思路——基于变压器磁路控制的谐波抑制技术。在传统电力变压器上附加控制绕组，通过控制绕组注入相应的谐波电流，抑制负载绕组引起的谐波，从而使变压器原边电流不含相应的谐波。该方案使变压器在电网中不仅起电能传输和变压的作用，并且可用于电能质量控制。利用 Matlab中的电力系统仿真工具箱对该方案进行建模和仿真，理论分析和仿真研究验证了该方法的有效性。

关键词 变压器磁路控制；谐波抑制；瞬时无功功率理论；仿真

中图分类号 TM301.2 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2008)11-045-04

Simulation of the Harmonic Suppression Technology Based on Matlab

Wang Hongran, Liu Tiancui, Hong Naigang

(School of Electrical Engineering & Information, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract A novel harmonic suppression method, harmonic suppression based on magnetic circuit control of the transformer, is proposed. Control winding is added to the traditional transformer, which is input through the control winding to suppress the harmonic brought by the load winding so that no relevant harmonic is contained in the source current. By this scheme, the transformer plays not only the role of power transmission and transformation, but also that of power quality control. The scheme is built into models and simulated by the Power System Blockset, toolbox of Matlab. The validity of the method is proved by theoretical analysis and simulations.

Keywords magnetic circuit control of transformer; harmonic suppression; instantaneous reactive power theory; simulation

由于电力电子装置的大量投入使用，电网的谐波污染问题越来越严重。有源滤波器由于其优越的补偿性能得到广泛应用[1,2]。该方法直接与电网相连，用在电网线路上分流或注入谐波的方法来减少和消除谐波，电路结构复杂，而且对变压器运行造成影响。文中提出的谐波抑制方案不但能够有效抑制电力系统的谐波，而且简化了电路，减轻了变压器的负担，同时降低了成本。

收稿日期: 2008-01-28

作者简介: 王红然 (1979-)，女，硕士研究生。研究方向: 电力电子技术及应用。刘田翠 (1979-)，女，硕士研究生。研究方向: 基于 APF的谐波检测方法研究。洪乃刚 (1945-)，男，教授，硕士生导师。研究方向: 电力电子和电力拖动控制系统。

1 基于变压器磁路控制的谐波抑制原理

基于变压器磁路控制的单相谐波抑制原理，如图 1所示。图中 Na和 Nb分别是变压器的原、副边绕组，Nc是增加的变压器控制绕组，1为变压器的基波磁链，2为负载产生的谐波磁链，3为控制绕组产生的谐波磁链。对于三相变压器，只需在每相各增加一个控制绕组、电流检测器和谐波发生器，连接方法与单相变压器相同。

负载电流包含基波 (50 Hz)和谐波两种分量，它们在通过变压器副边绕组时分别产生基波磁势 F_1 和谐波磁势 F_2，从而在变压器的磁路中分别产生基波磁链 1和谐波磁链 2。在负载侧通过电

流检测器检出负载电流 I_2 中需要滤除的谐波分量 I_3，然后将其接入控制绕组 Nc，产生相关次谐波磁势 $F_3 = W \cdot I_3$（其中，F_3 为控制绕组的谐波磁势，W 为控制绕组匝数）。通过改变控制绕组的连接方式和控制绕组匝数 W，使谐波控制绕组产生的相关次谐波磁势 F_3 与负载侧产生的谐波磁势 F_2 大小相等而方向相反，从而使得由 F_3 产生的谐波磁链 3和由 F_2 产生的谐波磁链 2相互抵消。由于在变压器的磁路中消除了谐波的磁势和磁链，因此在变压器原边绕组中不会感应产生相关次谐波电流，使得由负载侧产生的谐波电流不会对变压器原边电网产生影响，从而达到治理电网谐波的目的[3]。

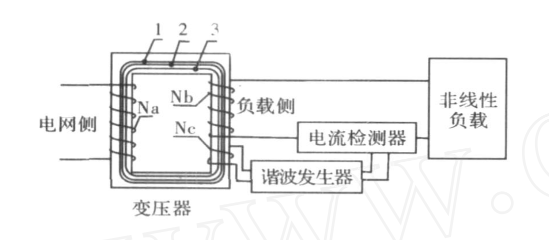


图 1 基于变压器磁路控制的单相谐波抑制原理图

2 原理验证

基于以上分析，通过研究负载绕组和控制绕组的谐波电流对电源电流的影响来验证上述方案的正确性。用 Matlab中的电力系统仿真工具箱对该方案进行建模和仿真[4-6]。

2.1 负载绕组的谐波电流对电源电流的影响

变压器负载绕组中的谐波分量在通过变压器副边绕组时产生谐波磁势 F_2，从而在变压器的磁路中产生谐波磁链 2，使得变压器原边电流发生畸变。以整流负载为例，研究变压器负载绕组谐波电流对电源电流的影响。仿真模型，如图 2所示。

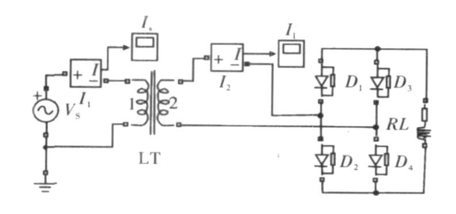


图 2 负载侧谐波电流的影响模型图

为了便于比较，可让变压器作等压变换。假定电源电压没有发生畸变，变压器参数为：$V_1 = V_2 = 220$ V，$R_1 = R_2 = 0.002\ \Omega$，$L_1 = L_2 = 0.08$ H。$R = 10\ \Omega$，$L = 0.1$ mH。负载电流和电源电流的各次谐波如表 1所示。

表 1 负载电流和电源电流的各次谐波 (单位：A)

谐波次数	1	3	5	7	9	11	13	15
负载 I_l	23.37	5.90	3.07	1.76	1.01	0.57	0.35	0.27
电源 I_s	23.29	5.90	3.07	1.76	1.01	0.57	0.35	0.27

可以看出，电源电流由标准的正弦波变成了含 3，5，7等奇次谐波的畸变电流。也就是说，负载绕组中的谐波电流会使电源电流发生畸变。在变压器作等压变换时，除基波外，电源电流 I_s 和负载电流 I_l 的各次谐波大小相等。说明在电源电压没有发生畸变的情况下，负载绕组的谐波电流对电源电流有直接影响。当变压器的参数变化时，用电流折算的方法，仍可得出该结论。

2.2 控制绕组注入的谐波电流对电源电流的影响

与负载电流相似，控制绕组电流的变化 (包括畸变)也必然会通过变压器在电源电流中有所反映。在控制绕组注入理想的谐波电流源，并适当调整其幅值和相位，研究变压器控制绕组谐波电流对电源电流的影响。仿真模型如图 3所示。

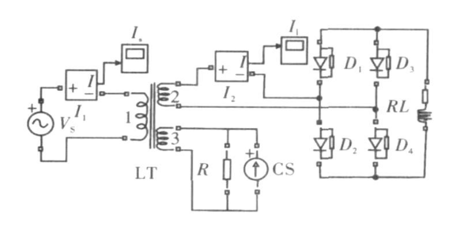


图 3 控制绕组谐波电流的影响模型图

滤波前后电源的各次谐波电流，如表 2所示。注入 3次谐波后，I_s 中的 3次谐波由 5.90减小到 0.60，注入 3，5次谐波后，I_s 中的 3次谐波由 5.90减小到 0.86，5次谐波则由 3.07减小到 0.71。由于谐波电流源的幅值和相位很难精确控制，因此很难将某次谐波的幅值减小到零。说明如果能产生与变压器原边电流的谐波分量大小相等、方向相反的补偿电流，就能消除变压器原边电流中的该次谐波。

表 2 控制绕组注入谐波电流后，电源电流的各次谐波 (单位：A)

谐波次数	1	3	5	7	9	11	13	15
滤波前 I_s	23.37	5.90	3.07	1.76	1.01	0.57	0.35	0.27
3次滤波	23.62	0.60	3.15	1.79	1.01	0.54	0.28	0.17
5次滤波	23.55	5.99	0.24	1.81	1.04	0.57	0.30	0.17
7次滤波	23.48	5.98	3.17	0.09	1.08	0.60	0.32	0.19
3，5次滤波	23.76	0.86	0.71	1.90	1.10	0.62	0.34	0.19
3，5，7滤波	23.82	0.89	0.76	0.66	1.21	0.73	0.43	0.26

3 系统仿真与结果分析

3.1 负载绕组的谐波检测

负载绕组中谐波电流的检测采用以瞬时无功功率理论为基础的单相电路谐波检测方法。

由于从单相构造构造三相时，有 240 的延时，这一延时影响了检测方法的实时性。为减小这一延时，文中由单相电流直接构造两相电流，即令 $I_α = I_1$，$I_α$延时 90 为 $I_β$。然后按照 I_p - I_q方式计算负载电流的谐波。其原理，如图 4所示，LPF为低通滤波器，PLL为锁相环，其后为正弦、余弦信号发生电路。这部分电路能消除负载电压波形畸变对检测结果的影响，使得检测结果比较准确[7]。

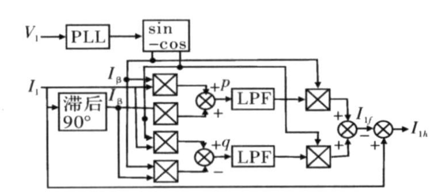


图 4 单相电路谐波检测原理图

3.2 控制绕组的谐波注入

无源滤波器只能滤除特定次谐波，并且可能与变压器阻抗发生谐振，使该次谐波放大。有源滤波器则克服了上述缺陷，并能实现动态补偿。因此，控制侧的谐波注入采用有源滤波方式。其仿真模型，如图 5所示。

把图 4中检测出的谐波电流 I_{1h}作为补偿电流的指令信号与实际的补偿电流信号 I_c进行比较，两者的偏差 $\triangle I_c$作为滞环比较器的输入。通过滞环比较器产生主电路中开关通断的 PWM信号，该信号经驱动电路控制开关的通断，从而控制补偿电流 I_c的变化。

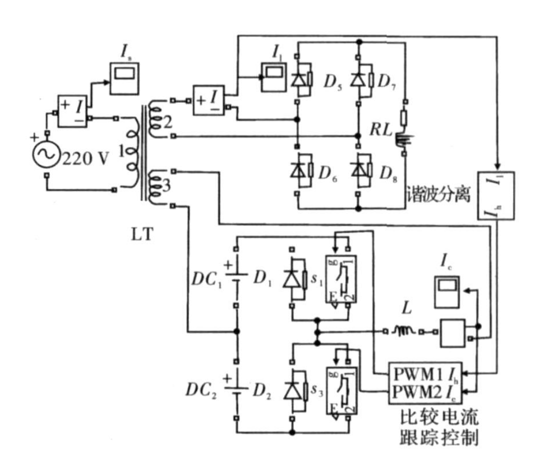


图 5 控制侧的谐波注入模型图

3.3 结果与分析

图 5的参数设置如下：$DC_1 = DC_2 = 700$ V，$L = 5$ mH，变压器参数不变。注入控制绕组中的谐波电流 I_c和注入 I_c前变压器原边电流 I_s的波形如图 6所示。I_s的 THD由 29.95%降为 0.48%，功率因数由 0.80提高到 0.96，I_s的波形如图 7所示。注入控制电流前后电源电流的各次谐波，如表 3所示。

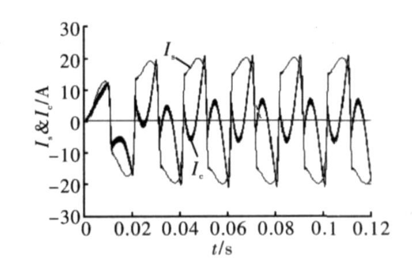


图 6 注入的谐波电流 I_c 和注入 I_c 前 I_s 的波形

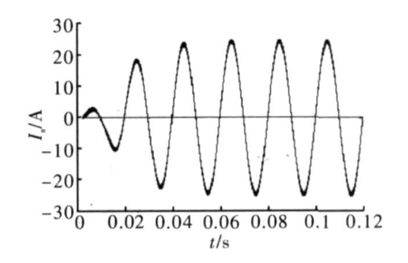


图 7 注入 I_c 后，I_s 的波形

由图 7可以看出，注入 I_c后，变压器原边电流 I_s在一个周期左右达到稳定状态。由表 3所示，I_s基波基本不变，但各次谐波大大减小。说明控制绕组逆变产生的谐波电流和变压器原边电流的谐

波分量方向相反，抵消了电源电流中的大部分谐波分量。仿真结果和理论分析一致，进一步验证了文中谐波抑制方案的可行性。

表 3 控制绕组注入谐波前后，电源电流的谐波 (单位：A)

谐波次数	1	3	5	7	9	11	13	15
控制 I_c	9.87	6.80	3.84	2.51	1.74	1.26	0.90	0.71
注入前 I_s	23.37	5.90	3.07	1.76	1.01	0.57	0.35	0.27
注入后 I_s	24.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01

4 结束语

文中通过研究变压器负载侧和控制侧的谐波电流对电源电流的影响，提出了在变压器电源电压无畸变的情况下，通过变压器磁路控制抑制电源谐波电流的方案。理论分析和仿真结果表明，通过变压器磁路控制能有效抑制电力系统谐波。

消除谐波的过程在变压器内部完成，可以取得更好的谐波抑制效果。由于控制绕组注入的谐波电流抵消了电源电流的大部分谐波，减小了电源电流，因此减轻了变压器的负担。

在电网线路上注入谐波的方法在注入谐波时需要专门的变压器，而文中提出的谐波抑制方案只需在传统电力变压器上附加控制绕组，通过控制绕组注入相应的谐波电流来抑制由负载绕组引起的谐波。因此，该方案不但简化了电路，而且降低了成本。当然，对变压器的制作也提出了更高的要求。

参考文献

[1] Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning [J]. IEEE Transaction on Industry Applications (S0093 - 9994), 1996, 32(6): 1312 - 1320.
[2] 杨 君，王兆安. 并联型电力有源滤波器控制方式的研究 [J]. 西安交通大学学报，1995, 29(3): 97 - 102.
[3] 杨华云，任士焱. 基波磁势自平衡谐波抵消式串联有源滤波器 [J]. 电工技术学报，2005, 20(5): 45 - 48.
[4] 任永峰，李含善，云怀中，等. 并联型电能质量控制器的建模仿真研究 [J]. 系统仿真学报，2007, 19(20): 4620 - 4623, 4684.
[5] 洪乃刚. 电力电子技术基础 [M]. 北京：清华大学出版社，2008.
[6] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab仿真 [M]. 北京：机械工业出版社，2006.
[7] 王兆安，杨 君，刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2006.

(上接第 44页)

由图 7可以看出，无信道编码的情况下，信道模型为高斯白噪声信道，BPSK调制方式下接收端在 $E_b \cdot N_0^{-1} = 8.4$ dB时误码率性能达到 10^{-4}。如果发送端采用 Turbo编码，在接收端采用 log - map算法译码，译码算法无迭代过程时，误码率在达到 10^{-4}时性能大约好了近 4 dB。如果在接收端用一次迭带过程可以得到更好的误码性能，但随这信噪比的增加，性能并没有改善，出现地板效应[6] (错误平层现象)。

3 结束语

Turbo编码方案是近年来最佳信道编码方案之一。随着科学技术的发展和编码技术研究的不断深入，新的编码方案不断提出。但总体而言，编码技术和信道估计、多天线技术、调制技术[7]的结合则是业内今后研究的重点方向。

参考文献

[1] 王 琳，徐立凯. 高效信道编译码技术及其应用 [M]. 北京：人民邮电出版社，2007.
[2] Pursley M B. 数字通信导论 [M]. 叶芝慧，译. 北京：电子工业出版社，2007.
[3] Ziemer R E, Tranter W H. 通信原理系统、调制与噪声 [M]. 5版. 袁东风，江铭炎，译. 北京：高等教育出版社，2007.
[4] 袁东风. 宽带移动通信中的先进信道编码技术 [M]. 北京：北京邮电大学出版社，2004.
[5] 罗 宏. Turbo均衡技术的研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2006.
[6] Takeshita O Y, Fossorier M P C, Costello Jr D J. A New Technique for Computing the Weight Spectrum of Turbo Codes [J]. IEEE Trans Commun, 1999, 3(2): 251 - 253.
[7] Gamal H E, Hammons A R. Analyzing the Turbo Decoder Using the Gaussian Approximation [J]. IEEE Trans Info Theory, 2001, 47(2): 671 - 687.